Phase Locked Loop (PLL)

Met een Phase Locked Loop kunt u de fase of frequentie van één signaal vergrendelen met dezelfde grootheid van een tweede signaal. In dit artikel geef ik een uitgebreide inkijk in deze interessante analoge techniek.

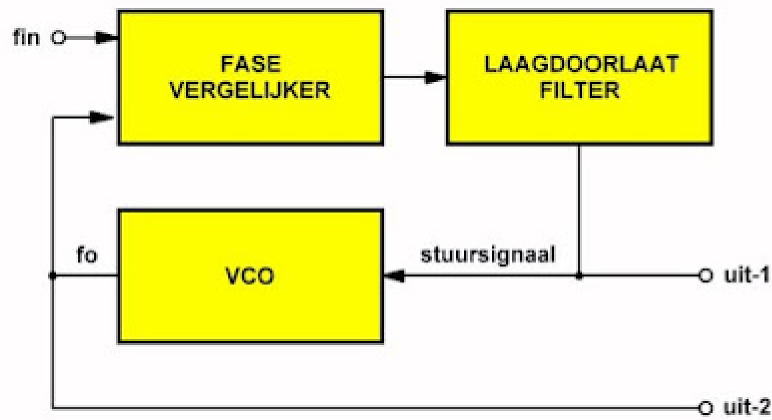
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 16-01-2021

Inleiding

Wat u van dit artikel kunt leren
Toegegeven, dit is een heel lang artikel. Maar dit artikel gaat over veel meer dan PLL. U maakt kennis met een paar heel belangrijke technieken uit de analoge elektronica, zoals fasevergelijkers, spanningsgestuurde oscillatoren (VCO) en hoe terugkoppelingen tussen diverse blokken werken. De besproken bouwstenen van een phase locked loop komt u niet alleen dáár tegen, maar ook als zelfstandig bruikbare schakelingen.

Het basisprincipe van PLL
Letterlijk vertaald betekent PLL of '*Phase Locked Loop*' fasevergrendelde lus. Zo'n vergrendelde lus kunt u gebruiken om de frequentie of de fase van twee wisselspanningssignalen met elkaar te vergrendelen. Dat wil zeggen dat de schakeling de frequentie of de fase van het tweede signaal automatisch aan de grootheden van het eerste signaal zal aanpassen.

Het blokschema van PLL
Het blokschema van een PLL is getekend in de onderstaande figuur. Hart van de schakeling is een VCO, een spanningsgestuurde oscillator. Deze wekt een uitgangssignaal f_o op waarvan de frequentie wordt bepaald door een stuurspanning op de ingang van de VCO. Het uitgangssignaal van deze VCO wordt in een zogenaamde fasevergelijker vergeleken met de fase en de frequentie van het ingangssignaal van de PLL. Deze vergelijker zal een gelijkspanning opwekken waarvan de waarde en de polariteit recht evenredig zijn met het frequentie- of faseverschil tussen beide ingangssignalen. Het uitgangssignaal van deze fasevergelijker is echter in de meeste gevallen een blokpuls en is niet zonder meer geschikt voor het besturen van de VCO, die immers met een gelijkspanning bestuurd wil worden. Vandaar dat er tussen beide schakelingen een laagdoorlaat filter is opgenomen dat de blokspanning op de uitgang van de fasevergelijker omzet in een mooie gelijkspanning. Met deze gelijkspanning wordt de frequentie van de VCO geregeld.



Het principiële blokschema van een Phase Locked Loop.
(© 2021 Jos Verstraten)

Zonder terugkoppeling werkt het niet
Een PLL is dus een in zichzelf teruggekoppeld systeem, waarbij de terugkoppeling er voor zorgt dat iedere wijziging in fase of frequentie van het ingangssignaal onmiddellijk wordt teruggekoppeld naar de eigen VCO. Deze past zijn eigen frequentie of fase zo snel mogelijk aan. De gelijkheid tussen beide grootheden wordt hersteld.

De principiële schakeling van een PLL
Zoals reeds geschreven bestaat de meest principiële PLL-schakeling uit slechts drie blokken:
- Een fasevergelijker aan de ingang.
- Een laagdoorlaat filter.
- Een spanningsgestuurde oscillator.

Deze drie blokken zijn op de in de bovenstaande figuur geschetste manier met elkaar verbonden. Deze basis opzet is specifiek voor iedere PLL en u zult deze steeds terugvinden, hoe ingewikkeld de schakeling ook is.
In de volgende hoofdstukken wordt de werking van deze blokken eerst afzonderlijk besproken, nadien zullen deze in hun teruggekoppelde situatie worden beschreven. Aan deze terugkoppeling dankt een PLL immers zijn unieke eigenschappen!

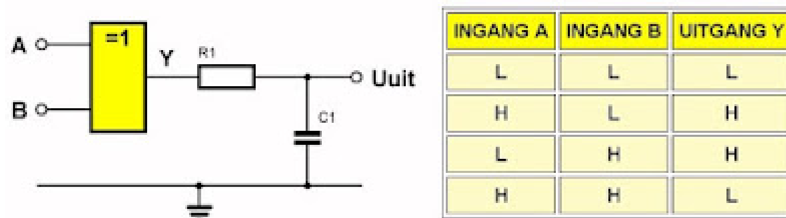
De fasevergelijker

Drie technieken
Er worden verschillende systemen toegepast om de fasevergelijker op te bouwen. De drie meest voorkomende schakelingen zijn:
- De EXOR-poort.
- De edge-controlled fasevergelijker.
- De analoge vermenigvuldiger.

De EXOR-poort als fasevergelijker

Het principe
In de meest eenvoudige uitvoering bestaat de fasevergelijker van een PLL uit niets meer dan een eenvoudige EXOR-poort. De symbolen en de waarheidstabel van een dergelijke digitale schakeling zijn getekend in de onderstaande figuur. De fundamentele eigenschap van een EXOR-poort is dat de uitgang 'L' is als beide ingangen aan elkaar gelijk zijn. Als bijgevolg aan beide ingangen blokvormige signalen liggen die precies dezelfde frequentie hebben, maar die ook nog eens in fase verlopen, dan zullen beide ingangen steeds dezelfde waarde hebben, namelijk 'L' of 'H'. De uitgang van de poort zal dan steeds 'L' zijn. Bij de minste of geringste fase- of frequentie-afwijking tussen beide ingangssignalen zullen er momenten zijn dat de

twee ingangen elkaars inverse zijn. De uitgang reageert daarop door smalle positief gerichte pulsjes te genereren. De aanwezigheid van deze pulsjes duidt dus op een frequentie- of fase-ongelijkheid aan de ingang.
Deze smalle pulsjes moeten door middel van het laagdoorlaat filter worden omgezet in een stuurspanning voor de VCO. In de onderstaande figuur is de meest eenvoudige uitvoering van een dergelijk filter getekend achter de uitgang Y van de EXOR-poort.

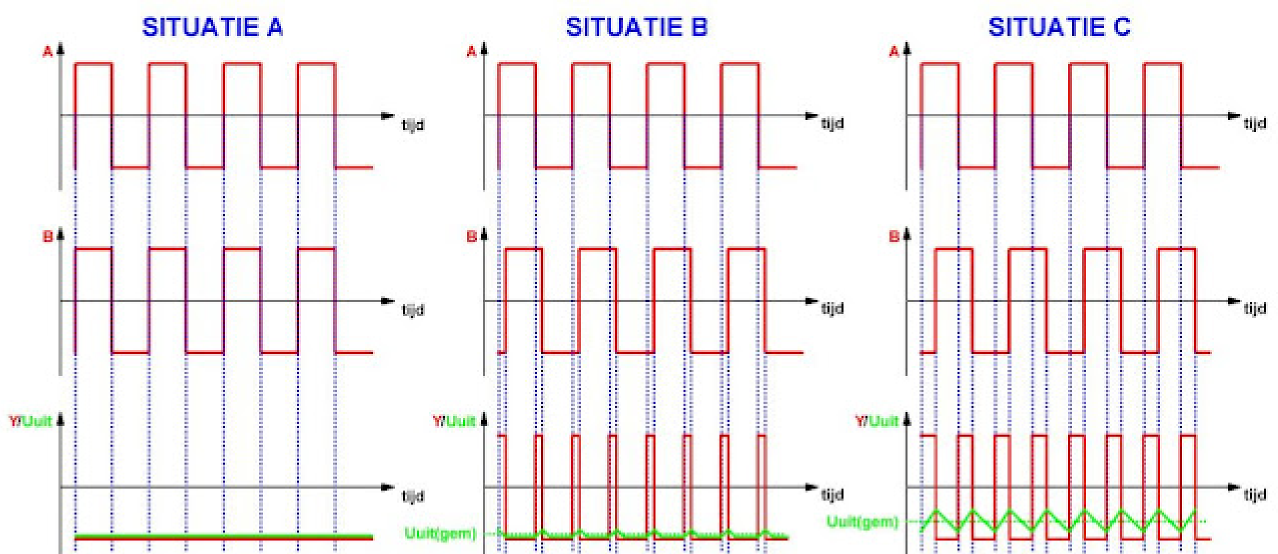


INGANG A	INGANG B	UITGANG Y
L	L	L
H	L	H
L	H	H
H	H	L

Een fasevergelijker met een EXOR-poort. (© 2021 Jos Verstraten)

De werking van de EXOR schakeling
De werking van de combinatie EXOR-poort en laagdoorlaat filter kan het eenvoudigst grafisch verklaard worden. In de grafieken van de twee onderstaande figuren worden zes situaties vergeleken. Bij het bestuderen van deze grafieken wordt er van uitgegaan dat een logische 'H' overeen komt met een positieve spanning en een logische 'L' met een negatieve spanning.

- In de linker grafiek van *SITUATIE A* bestaat er geen frequentie- en faseverschil tussen beide ingangssignalen A en B van de poort. De uitgang Y (*rood*) staat continu op 'L'. De condensator laadt zich tot deze negatieve spanning op. Het filter levert dus een grote negatieve gelijkspanning U_{uit} (*groen*) af.
- In de grafieken van *SITUATIE B* bestaat er een kleine faseverschuiving tussen beide signalen A en B. Op de uitgang van de poort ontstaan smalle positieve pulsjes Y, het gevolg is dat de condensator zich tijdens deze pulsjes iets minder negatief oplaadt. De gemiddelde spanning over de condensator $U_{uit(gem)}$ wordt iets positiever, dus iets minder negatief dan in het geval van signalen in fase.
- In de grafieken van *SITUATIE C* neemt de faseverschuiving toe. Het gevolg is dat de positieve pulsen op de uitgang van de poort breder worden en de condensator zich meer oplaadt tussen de ontlaadperioden. De gemiddelde gelijkspanning over dat onderdeel wordt nog minder negatief.



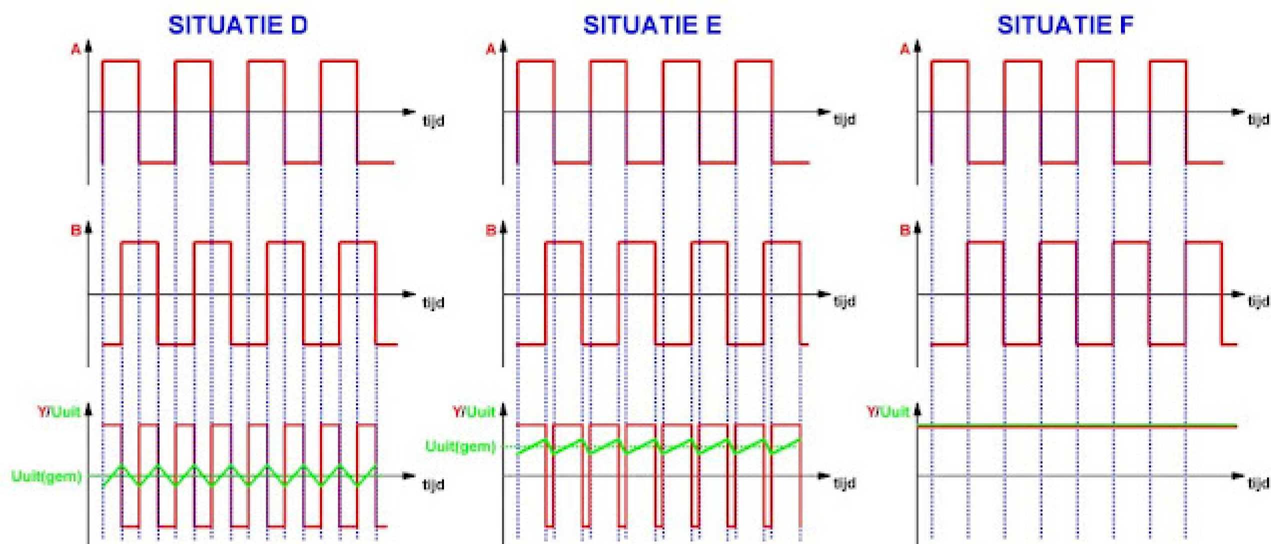
De werking van de EXOR-poort plus filter, deel 1. (© 2021 Jos Verstraten)

Wij gaan nu verder met de grafieken die in de onderstaande figuur zijn getekend.

- In de grafieken van *SITUATIE D* is getekend wat er gebeurt als er een faseverschil van precies 90° bestaat tussen beide ingangssignalen. Het gevolg is dat de pulsen op de

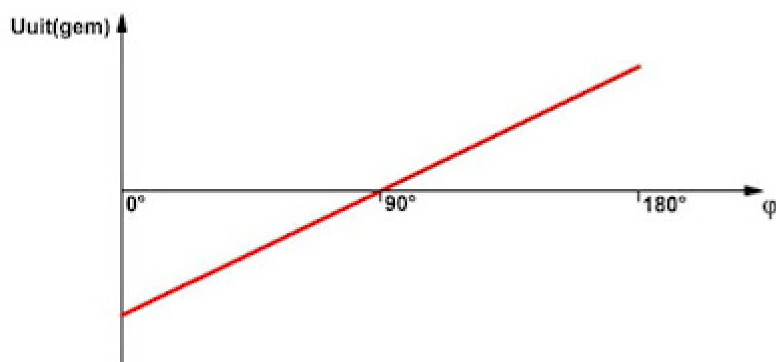
uitgang van de poort symmetrische worden. De condensator kan zich nu even lang opladen als ontladen, met als logisch gevolg dat de gemiddelde spanning over dat onderdeel gelijk wordt aan 0 V.

- In de grafieken van *SITUATIE E* neemt de faseverschuiving nog meer toe. De positieve pulsen op de uitgang van de poort worden nu breder dan de negatieve, met als logisch gevolg dat de gemiddelde spanning over de condensator positief wordt.
- Deze toestand is nog meer uitgesproken in de grafieken van *SITUATIE F*. Nu bestaat er een faseverschil van precies 180° tussen beide ingangsspanningen. De uitgang van de poort staat dan continu op 'H' met als gevolg dat de condensator zich tot deze grote positieve spanning oplaadt.



De werking van de EXOR-poort plus filter, deel 2. (© 2021 Jos Verstraten)

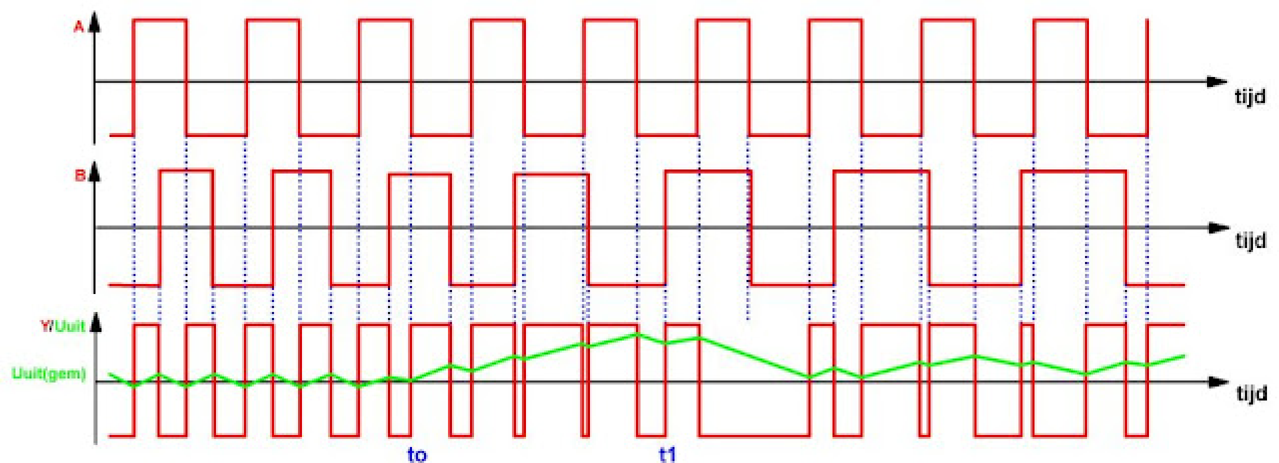
Samenvatting
U kunt de werking van de schakeling samenvatten in een grafiek waarin het verband wordt gegeven tussen de gemiddelde spanning over de condensator $U_{uit(gem)}$ en de faseverschuiving φ tussen beide ingangssignalen. Dit is getekend in de onderstaande figuur. De spanning over de condensator stijgt lineair tussen een maximale negatieve waarde en een maximale positieve waarde als het faseverschil tussen beide ingangsspanningen toeneemt van 0° tot 180°. Bij een faseverschil van 90° staat over de condensator een spanning van 0 V.



Het verband tussen de condensatorspanning en het faseverschil tussen beide ingangssignalen. (© 2021 Jos Verstraten)

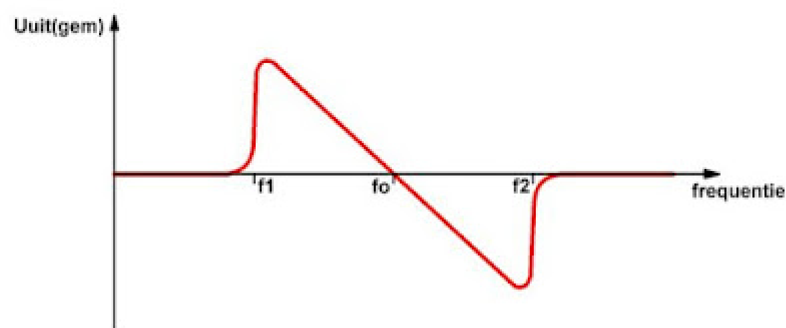
Nu variëren de frequenties van beide signalen
Wat er gebeurt als niet de fase, maar de frequentie van beide signalen varieert is grafisch voorgesteld in de onderstaande figuur. Een van de signalen heeft een constante frequentie f_o. De bespreking start met gelijke, maar 90° in fase verschoven frequenties aan de ingang. De spanning over de condensator is dan 0 V.
Als de frequentie van het tweede signaal langzaam daalt (tijdstip t_0), kunt u vaststellen dat de

spanning over de condensator positief wordt. Dat is logisch, want de frequentie-afwijking heeft onmiddellijk een faseverschuiving tot gevolg. Maar als het frequentieverschil tussen beide signalen blijft stijgen zult u vaststellen dat op een bepaald moment, t_1 in de grafiek, de condensatorspanning niet verder toeneemt maar weer gaat dalen. Deze daling gaat zelfs vrij snel. Dat is ook logisch, want als de frequenties van beide ingangssignalen te ver uit elkaar lopen, zullen hun perioden zo asynchroon verlopen dat er het ene moment sprake is van een positief faseverschil en het andere moment van een negatief faseverschil. De condensator zal afwisselend op- en ontladen, met als gevolg dat de gemiddelde spanning weer naar nul gaat. Hetzelfde grafiekje kunt u opstellen voor een ingangssignaal waarvan de frequentie groter wordt dan deze van het referentiesignaal. U zult dan vaststellen dat er over de condensator weer een gelijkspanning wordt opgebouwd, maar nu een negatieve. Dit gaat verder tot het frequentieverschil te groot wordt en de condensatorspanning weer naar nul gaat.



Het verloop van de condensatorspanning als de twee ingangssignalen afwijkende frequenties hebben.
(© 2021 Jos Verstraten)

Samenvatting
Het verband tussen de spanning $U_{uit(gem)}$ over de condensator en de frequentie-afwijking van het tweede signaal kan grafisch weergegeven worden door de grafiek van de onderstaande figuur. Het gebied van f_1 tot f_2 noemt men het *vanggebied* van de schakeling, een van de belangrijkste eigenschappen van een PLL-schakeling.



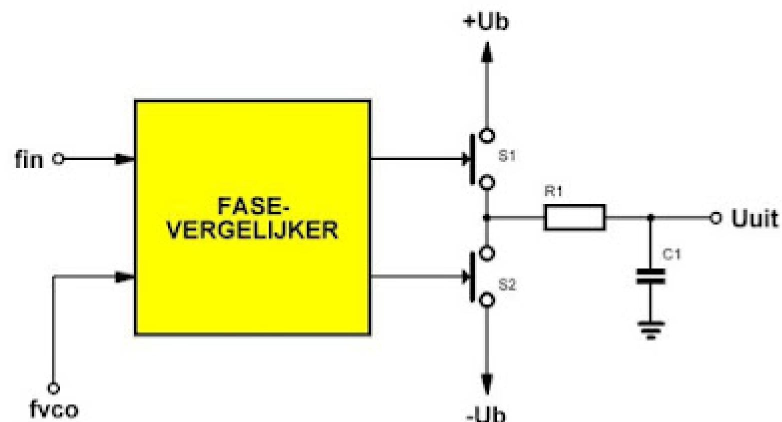
De relatie tussen de condensatorspanning en het frequentieverschil tussen beide ingangssignalen. (© 2021 Jos Verstraten)

De nadelen van de EXOR-methode
De combinatie van EXOR-poort met laagdoorlaat filter werkt uitstekend en er zijn dan ook tal van PLL-schakelingen die met dit systeem werken. Nadeel van de EXOR is echter dat u deze schakeling met mooie digitale blokpulsen moet aansturen. Bovendien verlangt de EXOR-oplossing dat de signalen symmetrisch in de tijd verlopen. De blokpulsen moeten dus een duty-cycle van exact 50% hebben!

De edge-controlled fasevergelijker

Het principe van het systeem
De edge-controlled fasevergelijker is een schakeling die u wel met digitale signalen moet aansturen, maar waarbij het niet noodzakelijk is dat deze signalen symmetrisch in de tijd verlopen. U kunt dus twee smalle pulsjes aan deze schakeling aanbieden en het systeem zal toch keurig de fase en de frequentie van deze signalen gaan vergelijken. Dat is een rechtstreeks gevolg van het feit dat deze schakeling alleen gevoelig is voor de voorflanken van de signalen. Het systeem meet als het ware het tijdverschil dat verloopt tussen de voorflank van het eerste signaal en de voorflank van het tweede signaal. Uit dit verschil en uit de volgorde van de flanken worden twee stuursignalen opgewekt, waarmee twee elektronische schakelaars worden gestuurd. Deze schakelaars laden de condensator van het filter op of ontladen dit onderdeel.

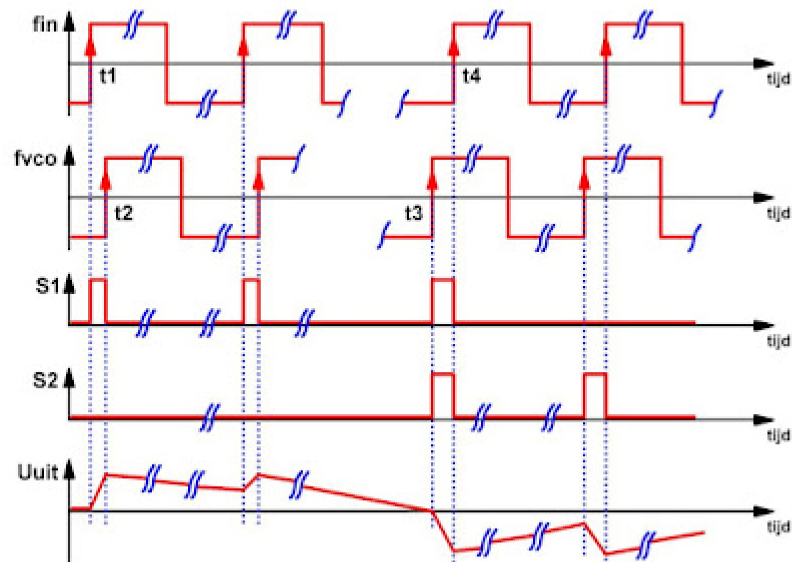
Het blokschema van het principe
Het blokschema van het systeem is getekend in de onderstaande figuur. De fasevergelijker is een ingewikkelde schakeling die uit meer dan vier flip-flop's bestaat. De werking is gecompliceerd en vandaar dat hier alleen gekeken wordt naar de manier waarop de twee elektronische schakelaars S1 en S2 worden gestuurd. Duidelijk is dat als S1 gesloten wordt de condensator C1 van het RC-filter zal opladen naar de positieve voedingsspanning. Als daarentegen S2 gesloten wordt, dan zal de condensator ontladen worden naar de negatieve voedingsspanning. Als de frequentie van het ingangssignaal vele malen kleiner is dan de frequentie van de VCO van de PLL, dan zal schakelaar S2 zowat continu gesloten worden. De condensator van het filter ontlaadt tot een negatieve spanning en in de gesloten lus van de PLL wordt deze spanning gebruikt om de frequentie van de VCO te verlagen. Als de frequentie van het ingangssignaal vele malen hoger is dan deze van de eigen VCO, dan zal schakelaar S1 vrijwel continu sluiten.
De condensator van het filter wordt nu opgeladen tot een positieve spanning en deze spanning wordt gebruikt voor het verhogen van de eigen frequentie van de PLL-schakeling. Als de frequentie van het ingangssignaal ongeveer gelijk wordt aan deze van de eigen VCO, dan zal de edge-controlled fasevergelijker de onderlinge relatie van de voorflanken van de twee signalen gaan vergelijken.



Het blokschema van een edge-controlled fasevergelijker.
(© 2021 Jos Verstraten)

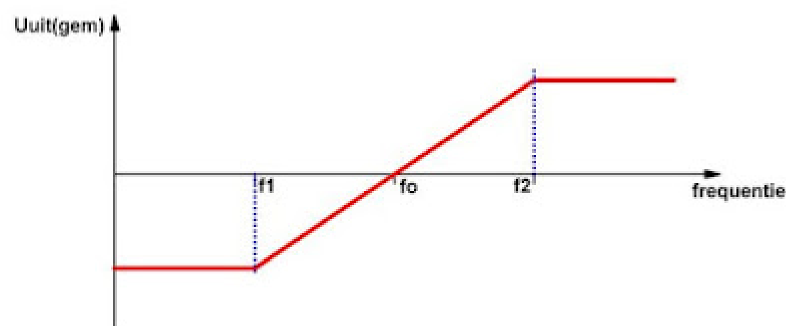
De werking van het systeem grafisch toegelicht
Als de voorflank van het ingangssignaal f_{in} het eerst komt, zoals getekend in de linker grafieken van de onderstaande figuur, zal schakelaar S1 gesloten worden. Deze schakelaar sluit bij het verschijnen van de voorflank van het ingangssignaal en opent bij het verschijnen van de voorflank van het VCO-signaal. De condensator van het filter wordt dus opgeladen tot een positieve spanning, waarvan de grootte rechtstreeks afhankelijk is van het tijdverschil tussen beide voorflanken. Deze positieve spanning zorgt ervoor dat de frequentie van de eigen VCO iets wordt verhoogd, waardoor het faseverschil tussen beide signalen wordt

verkleind of zelfs volledig verdwijnt.
Als de voorflank van het VCO-signaal het eerst verschijnt, zoals getekend in de rechter grafieken, zal schakelaar S2 gesloten worden. Ook nu opent deze schakelaar weer als de voorflank van het tweede signaal arriveert. De condensator wordt nu dus ontladen tot een negatieve spanning en deze stuurspanning zorgt ervoor dat de eigen frequentie van de VCO iets wordt verlaagd, zodat ook nu het faseverschil wordt weggeregeld.
Als er geen frequentie- en faseverschil tussen beide signalen aanwezig is, verschijnen beide voorflanken op precies hetzelfde moment en zal noch S1, noch S2 gestuurd worden. Over de condensator van het filter wordt geen spanning opgebouwd, de VCO zal oscilleren op zijn eigen frequentie.



De werking van de edge-controlled fasevergelijker grafisch toegelicht.
(© 2021 Jos Verstraten)

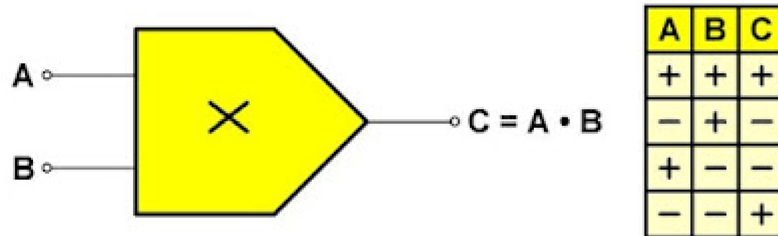
Samenvatting
Aan de hand van deze bespreking kunt u een grafiek opstellen die het verband geeft tussen het frequentie- of faseverschil en de uitgangsspanning van de fasevergelijker. Deze grafiek is getekend in de onderstaande figuur en ziet er fundamenteel anders uit dan dezelfde grafiek van het EXOR-systeem! Een PLL, uitgerust met een dergelijke fasevergelijker, zal er dan ook steeds voor zorgen dat zowel de frequentie als de fase van beide signalen aan elkaar gelijk zijn.
Een tweede verschil met het EXOR-systeem is dat de VCO op zijn minimale frequentie zal oscilleren als er geen ingangssignaal wordt aangelegd. De uitgangsspanning van het filter is dan immers maximaal negatief. Deze minimale frequentie wordt bepaald door het regelbereik van de VCO en door de maximale negatieve spanning die uit het filter komt.



Het verband tussen de uitgangsspanning en de frequentie- en faseverhouding van de twee ingangssignalen. (© 2021 Jos Verstraten)

De analoge vermenigvuldiger als fasevergelijker

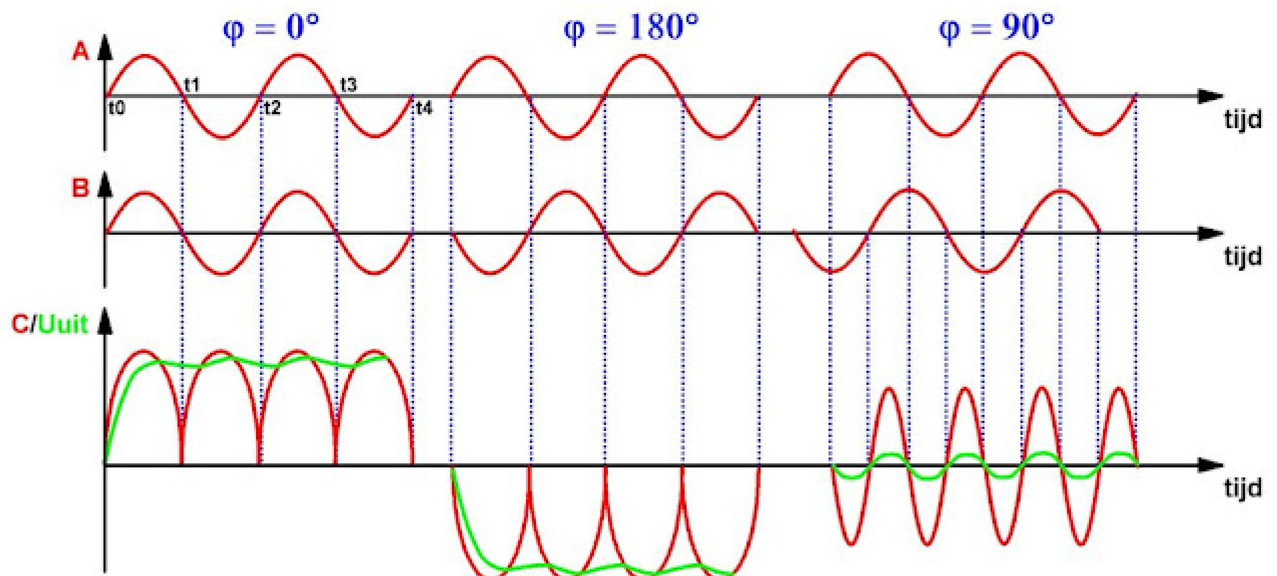
Wat is een analoge vermenigvuldiger?
De eigenschappen en het algemeen symbool van de analoge vermenigvuldiger zijn samengevat in de onderstaande figuur. Een analoge vermenigvuldiger is een schakeling die in staat is de wiskundige bewerking C = A • B uit te voeren. Hierbij zijn A en B de momentele waarden van twee analoge ingangsspanningen en C de momentele productwaarde van die twee ingangsgrootheden. De schakeling houdt rekening met de algebraïsche tekenwetten: plus maal plus geeft plus, maar ook min maal min geeft plus.



A	B	C
+	+	+
−	+	−
+	−	−
−	−	+

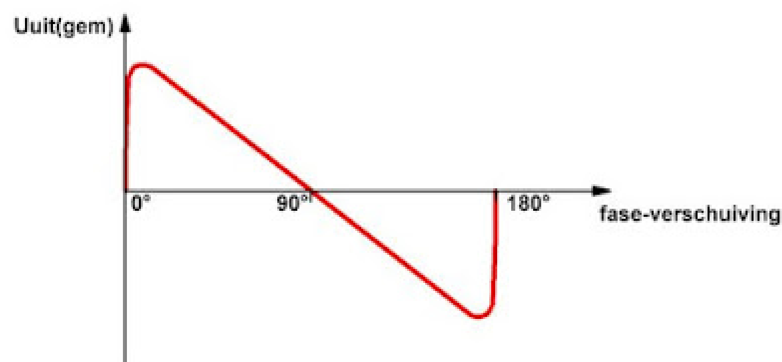
De analoge vermenigvuldiger. (© 2021 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
Dank zij deze eigenschap kunt u een analoge vermenigvuldiger gebruiken als fasevergelijker. Het grote voordeel van de schakeling is dat u kunt werken met sinusvormige spanningen. De werking wordt toegelicht aan de hand van de grafieken in de onderstaande figuur. In de linker grafieken wordt de situatie geschetst als beide ingangssignalen in fase zijn. Op de tijdstippen t_0, t_1, t_2, t_3 en t_4 gaan de ingangssignalen door nul. Het gevolg is dat de uitgangsspanning van de analoge vermenigvuldiger dan ook nul zal zijn. Tussen t_0 en t_1 zijn beide ingangssignalen positief. Het gevolg is dat ook de uitgangsspanning positief zal zijn. Tussen t_1 en t_2 zijn beide ingangssignalen negatief. De uitgangsspanning zal dus ook positief variëren. Als de ingangssignalen in fase zijn zal de uitgang van de analoge vermenigvuldiger bestaan uit een steeds positief variërend signaal.
Ook nu wordt de uitgang van de analoge vermenigvuldiger afgesloten door een RC-filter. Dit filter zal deze positieve halve sinussen afvlakken, met als gevolg dat er over de condensator van het filter een positieve spanning ontstaat (*groene grafiek*).
In de middelste grafieken wordt de situatie geschetst als beide ingangssignalen in tegenfase zijn. Omdat de momentele waarden van de twee spanningen nu steeds een tegengestelde polariteit hebben zal de uitgangsspanning van de analoge vermenigvuldiger tussen de nulpunten steeds negatief zijn. De condensator van het filter wordt nu dus maximaal negatief geladen.
In de rechter grafieken is de situatie getekend als er een faseverschil van 90° bestaat tussen de twee ingangsspanningen. De uitgangsspanning van de analoge vermenigvuldiger gaat nu dubbel zo vaak door nul omdat de nulpunten van de ingangsspanningen niet samenvallen. Tussen deze nulpunten zal de uitgangsspanning afwisselend positief en negatief zijn, omdat de polariteiten van de ingangsspanningen afwisselend gelijk en tegengesteld zijn. Op de uitgang van de analoge vermenigvuldiger ontstaat een soort sinusspanning met de dubbele frequentie, met als gevolg dat het gemiddelde gelijkspanningsniveau van dit signaal nul is.



De werking van de analoge vermenigvuldiger grafisch toegelicht. (© 2021 Jos Verstraten)

Samenvatting
Als u de resultaten van de drie besproken situaties samenvat ontstaat de grafiek van de onderstaande figuur. Een resultaat dat zeer vergelijkbaar is met de karakteristiek van de EXOR fasevergelijker. U kunt besluiten dat een analoge vermenigvuldiger een ideale fasevergelijker is, met als groot voordeel dat u de schakeling kunt sturen met sinusoidale signalen.
Daar is echter een maar aan verbonden. Het zal duidelijk zijn dat de uitgangsspanning van de analoge vermenigvuldiger, wat grootte betreft, afhankelijk is van de grootte van de ingangsspanningen. Als deze dus geen constante amplitude hebben, zal ook de uitgangsspanning van de analoge vermenigvuldiger een variërende amplitude hebben.
De uitgangsspanning van het filter is rechtstreeks afhankelijk van de grootte van deze uitgangsspanning. Het stuursignaal voor de VCO is dus niet alleen afhankelijk van de frequentie- en faserelatie tussen de twee ingangsspanningen, maar ook van hun grootte.



De werking van een analoge vermenigvuldiger samengevat. (© 2021 Jos Verstraten)

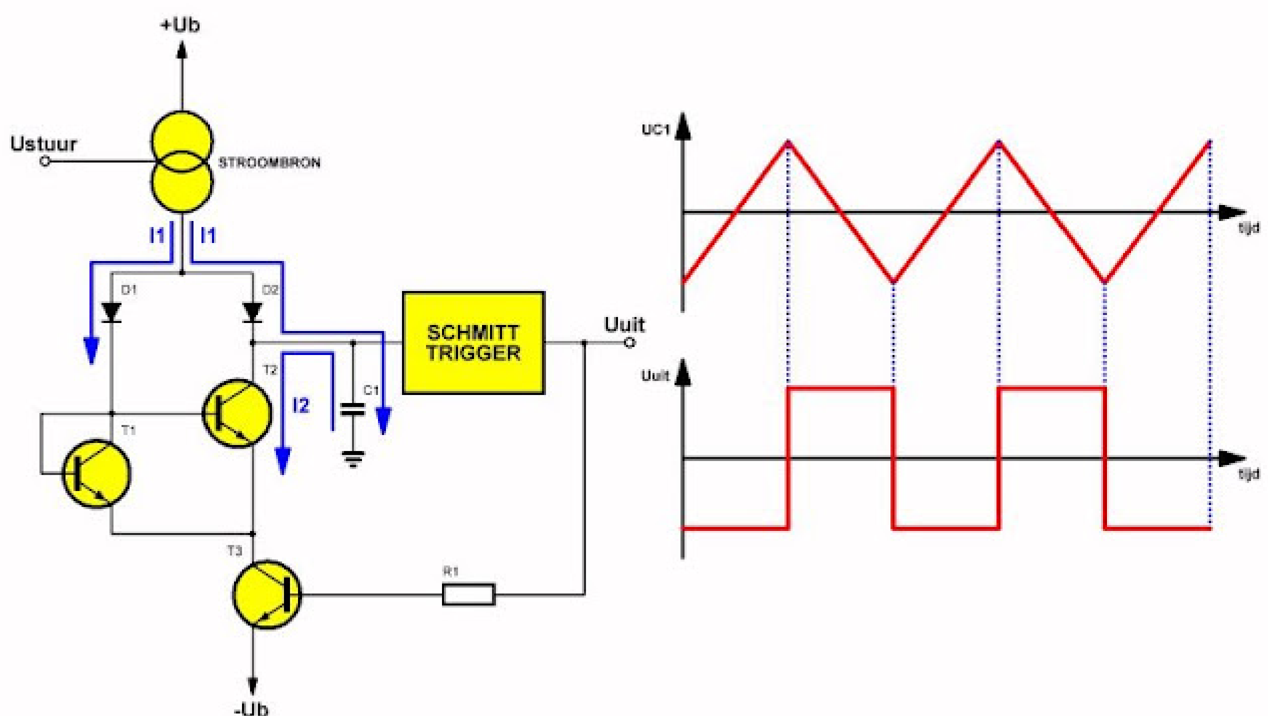
De voltage controlled oscillator

Ook hier diverse systemen
Men heeft verschillende systemen ontwikkeld waarmee u de frequentie van een oscillator kunt besturen met een gelijkspanning:
- VCO met één stroombron.
- VCO met integrator en comparator.
- Symmetrische VCO.

- Quadrature output VCO.

VCO met één stroombron

Het schema van een VCO met één stroombron
Een van de eenvoudigste uitvoeringen van een VCO, die werkt met één constante stroombron, is getekend in de onderstaande figuur. De schakeling bestaat uit een bestuurbare stroombron, die zijn uitgangsstroom via twee dioden D1 en D2 kan afvoeren. Belangrijk onderdeel is de condensator C1. Deze wordt in eerste instantie opgeladen door de stroom I_1 van de constante stroombron. De spanning over de condensator gaat lineair stijgen. Op de condensator is echter een Schmitt-trigger aangesloten, met twee symmetrische omschakeldrempels.
Als de spanning over de condensator gelijk wordt aan de bovenste drempel wordt de uitgang van de Schmitt-trigger 'H'. Het gevolg is dat de transistor T3 in geleiding wordt gestuurd. De stroom van de stroombron wordt nu via de geleidende transistor T1 afgevoerd naar de negatieve voedingsaansluiting. De basis/emitter-juncties van de transistoren T1 en T2 zijn echter parallel geschakeld. Het gevolg is dat beide transistoren identiek in geleiding worden gestuurd en dat door T2 een stroom zal vloeien die precies even groot is als de stroom die door T1 vloeit.
Deze stroom kan alleen maar afkomstig zijn van de condensator. De condensator gaat zich dus ontladen met een stroom I_2 die gelijk is aan de stroom die door T1 vloeit. Omdat deze stroom volledig bepaald wordt door de bestuurbare stroombron zal de condensator met een zelfde stroom ontladen als waarmee hij daarvoor geladen werd. Het gevolg is dat de condensatorspanning even snel lineair gaat dalen als hij gestegen is.
Dit proces gaat door totdat de condensatorspanning gelijk wordt aan de onderste drempel van de Schmitt-trigger. De uitgang van dat blok wordt weer laag, transistor T3 spert, stuurt de twee andere transistoren in sper en de condensator kan weer opladen.



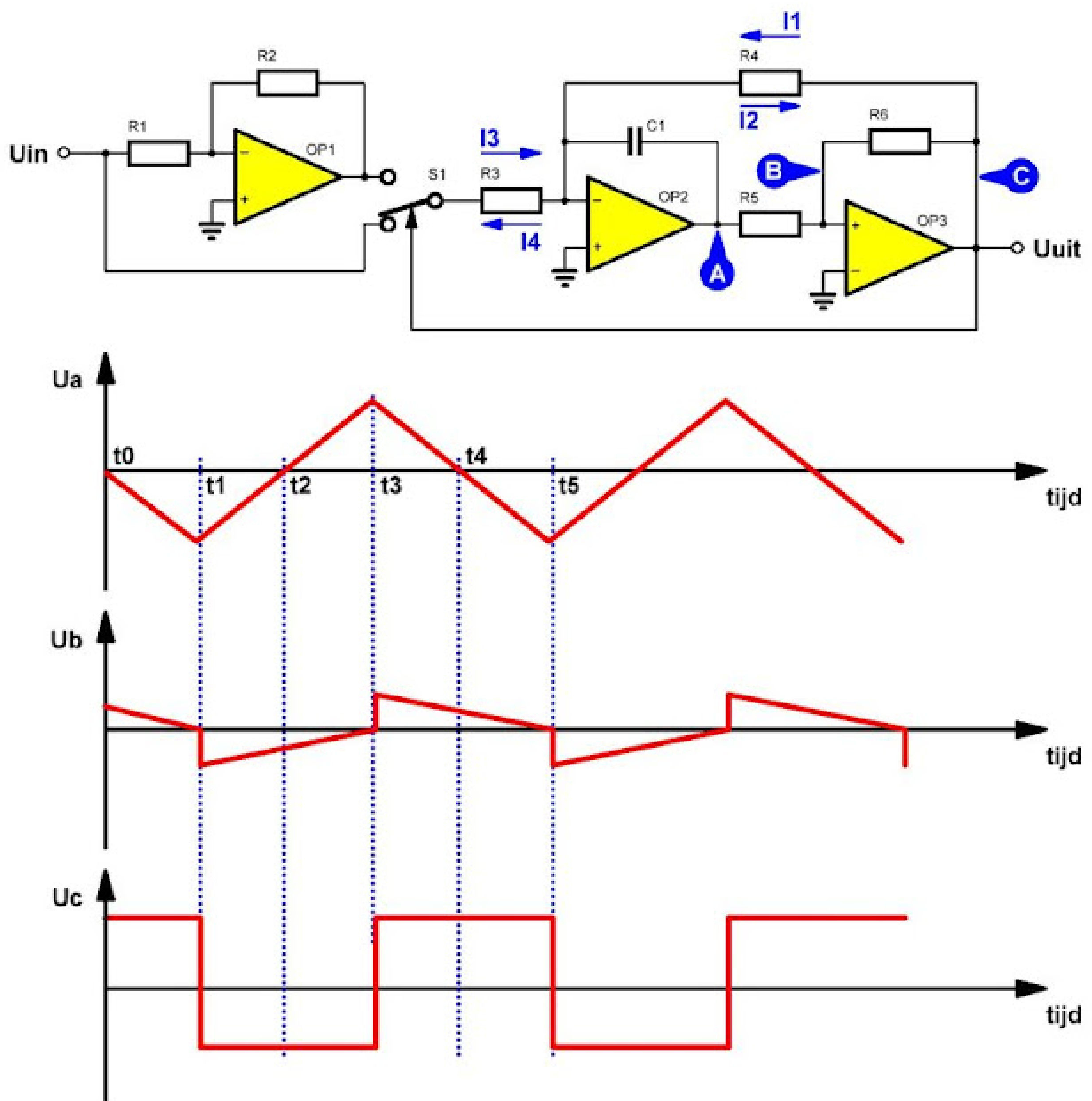
Een VCO met één stroombron. (© 2021 Jos Verstraten)

Conclusie
Het gevolg is dat over de condensator een driehoekvormige volledig symmetrische spanning ontstaat en dat op de uitgang van de Schmitt-trigger een vierkantvormige spanning ontstaat die uiteraard volledig synchroon verloopt met de driehoek. Deze blokspanning wordt gebruikt als de VCO wordt ingezet in een PLL. De spanning stuurt één van de ingangen van de

fasevergelijker en in de meeste gevallen wel deze die op een constante frequentie f_o wordt ingesteld.

De integrator-comparator schakeling

Het principe van de schakeling
Een vaak toegepast VCO-principe is dat van de integrator-comparator schakeling. Dat is dezelfde schakeling die het hart vormt van de meeste analoge functiegeneratoren. Het principiële blokschema is getekend in de onderstaande figuur. De schakeling is samengesteld rond drie operationele versterkers. De eerste (OP1) is geschakeld als inverterende versterker met een versterking van exact -1. De tweede (OP2) is geschakeld als integrator. De ingang van deze integrator wordt via de elektronische omschakelaar S1 gestuurd met het ingangssignaal (*onderste stand*) of met het geïnverteerde ingangssignaal (*bovenste stand*). De derde operationele versterker (OP3) is geschakeld als comparator. Deze vergelijkt de uitgangsspanning van de integrator (punt A) met de massa.
De ingangsspanning U_{in} is de stuurspanning van de schakeling die de frequentie van de VCO bepaalt en die geleverd wordt door het filter van de fasevergelijker.



De integrator-comparator schakeling. (© 2021 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
Stel dat de ingangsspanning gelijk is aan 0 V. De twee contacten van de schakelaar S1 staan dan beide op 0 V. Er vloeit dan geen stroom door de weerstand R3, want de inverterende ingang van OP2 ligt ook op massa-potentiaal. De niet-inverterende ingang van deze schakeling is immers rechtstreeks met de massa verbonden en iedere teruggekoppelde operationele versterker streeft ernaar het spanningsverschil tussen beide ingangen gelijk te maken aan nul.
De bespreking van de werking van de schakeling gaat uit van de veronderstelling dat op tijdstip t_0 de uitgangsspanning U_c van de comparator positief is. Deze spanning stuurt een stroom I_1 door de weerstand R4. Deze stroom zal de integrator OP2 voeden, waardoor de uitgangsspanning van deze schakeling lineair gaat dalen. Dat kan als volgt verklaard worden. De stroom I_1 kan alleen via de condensator verder vloeien. De operationele versterker heeft immers een zeer hoge ingangsimpedantie. De stroom die door de condensator vloeit heeft tot gevolg dat dit onderdeel lineair gaat opladen. Maar omdat de linker plaat van dit onderdeel aan de massa ligt (aan de inverterende ingang van OP2) kan het niet anders of de spanning op de rechter plaat van de condensator gaat dalen.
Tussen de punten A en C staat een spanningsdeler, samengesteld uit de weerstanden R5 en R6. De spanning op punt B wordt bepaald door de spanningen op de uitgangen van OP2 en OP3. Op tijdstip t_0 is deze spanning positief. Punt A staat immers op 0 V, punt B op een positieve spanning. Naarmate de uitgangsspanning van de integrator daalt, zal de spanning op punt B steeds minder positief worden.
Op tijdstip t_1 is de spanning op dat punt gedaald tot 0 V. De comparator OP3 slaat dan om. De inverterende ingang is immers met de massa verbonden. Het gevolg is dat de uitgangsspanning U_c van OP3 negatief wordt. Dat heeft twee gevolgen. Op de eerste plaats springt de spanning op punt B ook naar een negatieve waarde. De punten A en C staan nu immers allebei ingesteld op een negatieve spanning, het kan dus niet anders dan dat het knooppunt van de spanningsdeler tussen deze twee punten ook op een negatieve spanning staat. Op de tweede plaats gaat er nu een stroom I_2 door de weerstand R4 vloeien, die even groot is als I_1, maar in de tegengestelde richting door de weerstand vloeit. De integrator rond OP2 wordt nu gestuurd met een geïnverteerde stroom. Het gevolg is dat de condensator C1 nu gaat ontladen en dat de uitgangsspanning van de integrator OP2 gaat stijgen. Naarmate de uitgang van de integrator positiever wordt zal de spanning op punt B steeds meer de nul naderen.
Op tijdstip t_3 wordt de spanning op punt B gelijk aan 0 V en slaat de comparator weer om naar een positieve spanning op zijn uitgang.

De invloed van de ingangsspanning U_{in}
Tot nu toe is uitgegaan van een ingangsspanning van 0 V. Stel nu echter dat u aan de ingang van de schakeling een positieve spanning aansluit. De combinatie OP1 plus S1 zal er voor zorgen dat de ingangsstroom van de integrator toeneemt. Als de comparator OP3 de stroom I_1 via weerstand R4 aan de ingang van de integrator OP2 aanbiedt, dan zullen de genoemde onderdelen er voor zorgen dat via R3 een tweede stroom I_3 naar de ingang van de integrator vloeit. Beide stromen hebben dezelfde richting, met als gevolg dat de totaalstroom van de integrator stijgt. Als de uitgangsspanning van de comparator omklapt klapt ook de schakelaar S1 om, met als gevolg dat er nu via R3 een stroom I_4 uit de integrator wordt getrokken. In beide gevallen neemt dus de laad- of ontlaadstroom van de condensator C1 in dezelfde mate toe. Het gevolg is dat deze condensator sneller wordt geladen of ontladen. De frequentie van de schakeling stijgt.
Het zal duidelijk zijn dat deze frequentiestijging alleen afhankelijk is van de waarde van de weerstand R3 en de grootte van de ingangsspanning. Er bestaat dus een lineair verband tussen de frequentiestijging van de schakeling en de grootte van de positieve ingangsspanning.
Op dezelfde manier kunt u aantonen dat de frequentie van de schakeling daalt als aan de ingang een negatieve gelijkspanning wordt gelegd. Ook nu bestaat er een lineair verband tussen de grootte van deze spanning en de frequentiedaling.

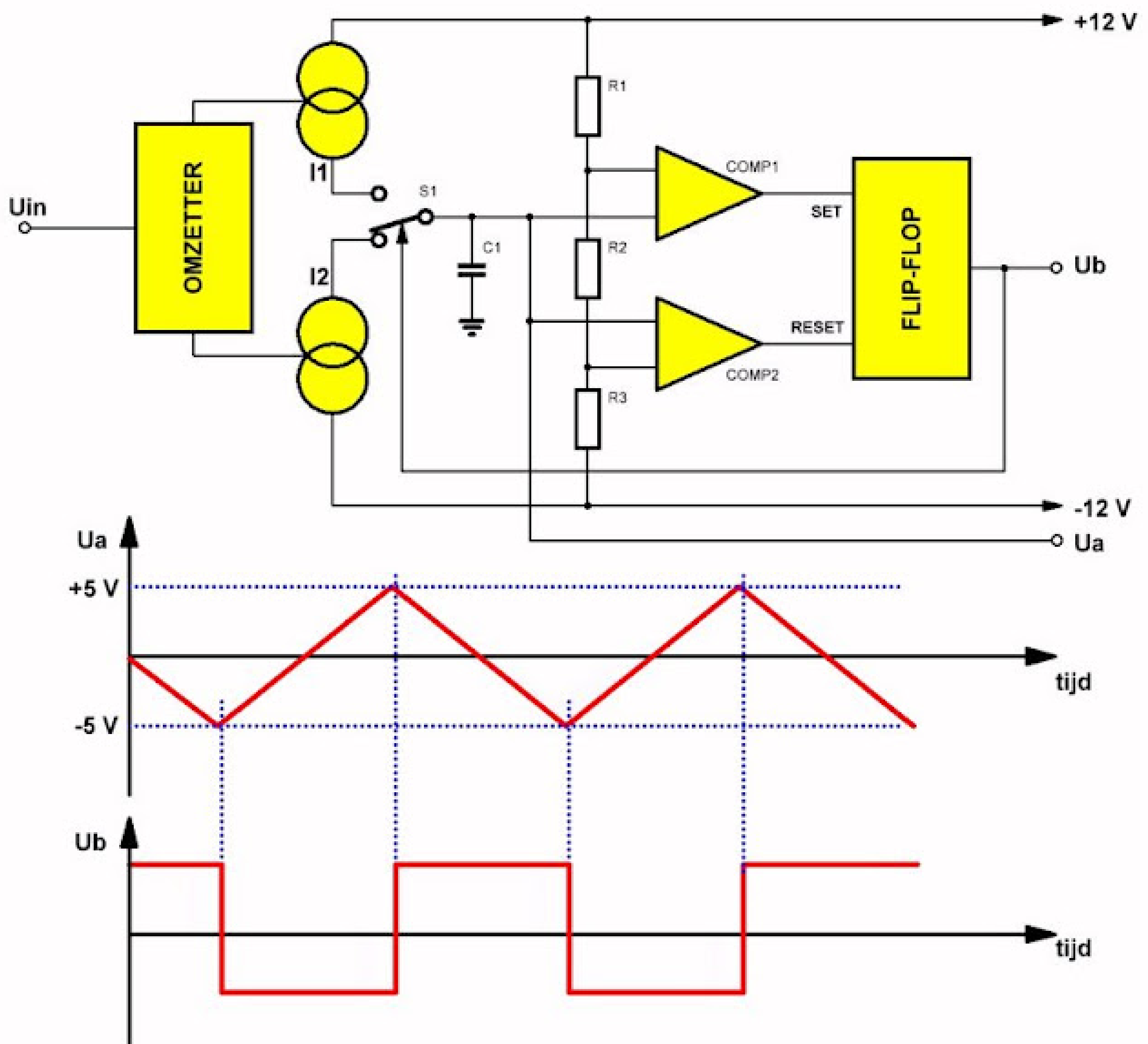
Samenvatting

De VCO-schakeling wekt op de uitgang van OP2 een driehoekvormige spanning op en op de uitgang van OP3 een blokvormige spanning. De frequentie van deze signalen wordt bepaald door de waarde van de weerstanden R3 en R4, de waarde van de condensator C1 en de grootte van de ingangsspanning U_{in}.

De symmetrische VCO

Het blokschema

Bij de symmetrische VCO, waarvan het blokschema getekend is in onderstaande figuur, wordt uitgegaan van twee stroombronnen die een condensator om de beurt laden en ontladen. De twee stroombronnen worden via een omzetter gestuurd uit het ingangssignaal. Deze schakeling zal ervoor zorgen dat beide stroombronnen door even grote stromen worden doorlopen, die echter tegengestelde polariteiten hebben. De waarde van deze stromen is afhankelijk van de grootte van de ingangsspanning.
De spanning over de condensator wordt in twee comparatoren vergeleken met twee symmetrische drempelspanningen, in het getekende voorbeeld +5 V en -5 V. De uitgangen van deze comparatoren sturen de set en de reset van een type-D flip-flop. De Q-uitgang van deze schakeling stuurt de elektronische omschakelaar S1 die de stroombronnen naar de condensator schakelt.



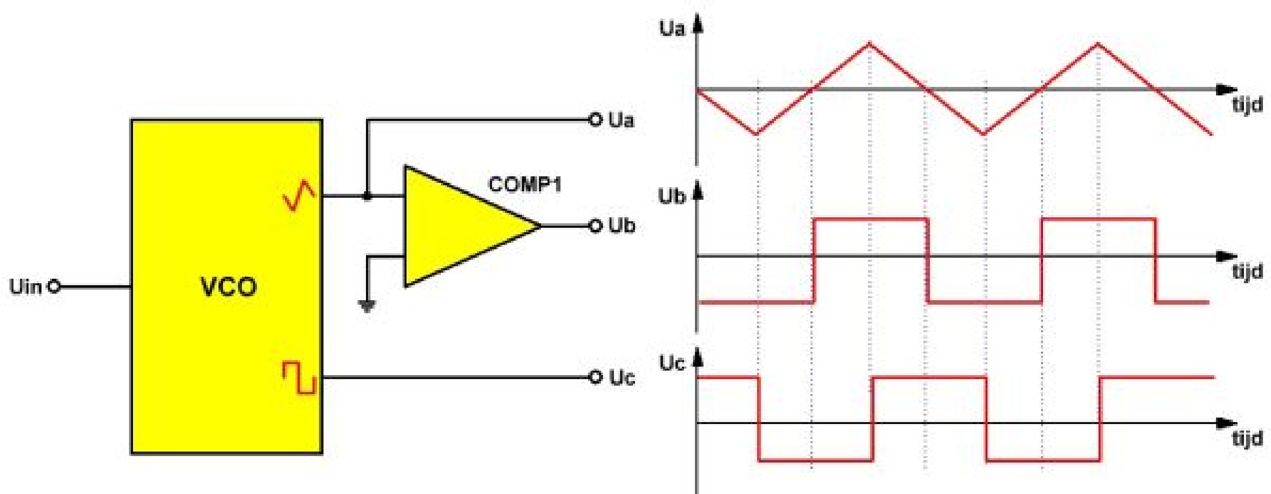
De symmetrische VCO. (© 2021 Jos Verstraten)

De werking van de schakeling
Stel dat de condensator C1 volledig is ontladen en dat de schakelaar S1 in de bovenste stand staat. De bovenste stroombron levert dan een stroom I_1 die de condensator lineair gaat opladen. Na een bepaalde tijd is de spanning over de condensator gestegen tot +5 V. De bovenste comparator klapt om, zijn uitgang stuurt de set van de flip-flop, de uitgang Q (U_b) van deze schakeling wordt positief. Deze spanning stuurt de elektronische omschakelaar S1 met als gevolg dat deze omklapt. De condensator wordt nu ontladen door de onderste stroombron met een stroom I_2. Na een bepaalde tijd wordt de spanning gelijk aan -5 V. De onderste comparator klapt om, zijn uitgang stuurt de reset van de flip-flop. De Q-uitgang wordt negatief, de omschakelaar klapt om en schakelt weer de laadstroom I_1 in.

Samenvatting
Over de condensator C1 ontstaat een driehoekvormige, volledig symmetrische spanning. De uitgang van de flip-flop levert een mooie symmetrische blokspanning.

De quadrature output VCO

Wat is een quadrature output?
De drie besproken VCO-schakelingen leveren een driehoekvormige en een blokvormige spanning af, met een identieke faserelatie. Als de driehoekvormige spanning stijgt, dan is de blokspanning negatief. Als de driehoek daalt, dan schakelt de blok om naar een positieve spanning. Er bestaat dus als het ware een faseverschuiving van 90° tussen beide uitgangsspanningen van de VCO's. Voor sommige PLL-toepassingen is het echter gewenst dat er een faseverschil van 0° bestaat tussen beide uitgangen. Vandaar dat een aantal PLL-IC's een derde uitgang heeft die de '*quadrature output*' wordt genoemd. Op deze uitgang staat een tweede blokvormige spanning die echter in fase verloopt met de driehoek.



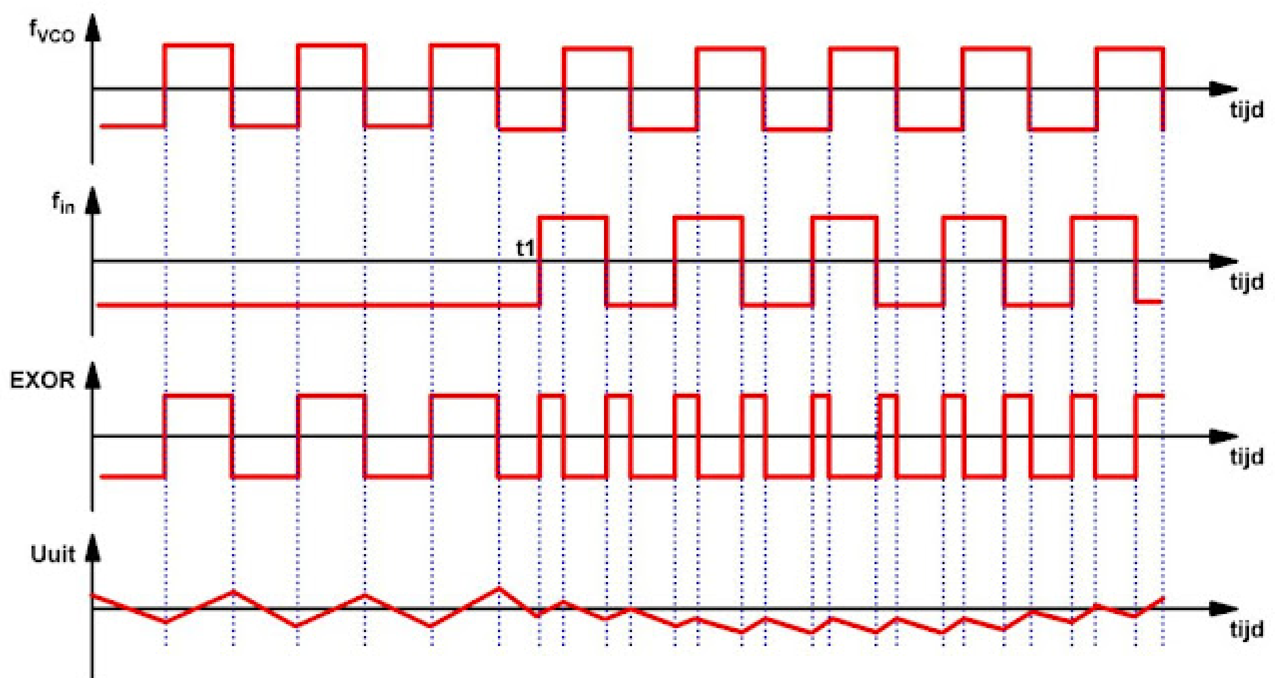
De quadrature output VCO. (© 2021 Jos Verstraten)

Het principe van de schakeling
Het eenvoudige principe voor het genereren van deze derde uitgang is getekend in de bovenstaande figuur. De driehoek uitgang van de VCO wordt aangesloten op een extra comparator waarin de driehoek vergeleken wordt met de massa. Als de driehoek positief is, dan levert de comparator een positieve spanning U_b. Duikt de driehoek echter onder de nul, dan slaat de comparator om en levert de schakeling een negatieve spanning. Op deze manier ontstaat dus een extra vierkantgolf, die in fase verloopt met de driehoek.

En nu de werking van de PLL

Inleiding
Aan de hand van de tot nu toe vergaarde kennis kan de werking van het teruggekoppelde systeem fasevergelijker + filter + VCO worden verklaard. Ook dat gaat het gemakkelijkst op een grafische manier. Daarbij wordt uitgegaan van een fasevergelijker die met een EXOR-poort is uitgevoerd.

De PLL met ingangssignaal met een frequentie f_o
Wat er gebeurt als aan de ingang van de PLL een ingangssignaal met de eigen frequentie f_o van de VCO wordt gelegd is getekend in de onderstaande figuur. Voor tijdstip t_1 is er geen ingangssignaal aanwezig. De fasevergelijker wordt nu alleen gestuurd met de uitgangsspanning van de VCO. Op de uitgang EXOR verschijnt dus hetzelfde signaal, een symmetrische blokspanning. Deze spanning doorloopt het filter en wordt op de bekende manier omgezet in een gelijkspanning van gemiddeld 0 V. Deze spanning stuurt de VCO, maar daar de spanning 0 V is zal deze geen effect hebben op de frequentie. De VCO wekt zijn eigen frequentie f_o op.
Op tijdstip t_1 verschijnt een ingangssignaal op de tweede ingang van de fasevergelijker met dezelfde frequentie f_o. Uiteraard bestaat er op dat moment een willekeurige faserelatie tussen beide signalen. Het gevolg is dat op de uitgang van de EXOR-poort smalle positieve of negatieve pulsen ontstaan. De spanning over de condensator zal stijgen of dalen, afhankelijk van de faserelatie tussen beide signalen. Deze spanning stuurt de VCO. Het gevolg is dat de frequentie van het signaal van deze oscillator gaat stijgen of dalen. Door deze frequentiewijziging zal de faserelatie tussen beide signalen gaan veranderen.



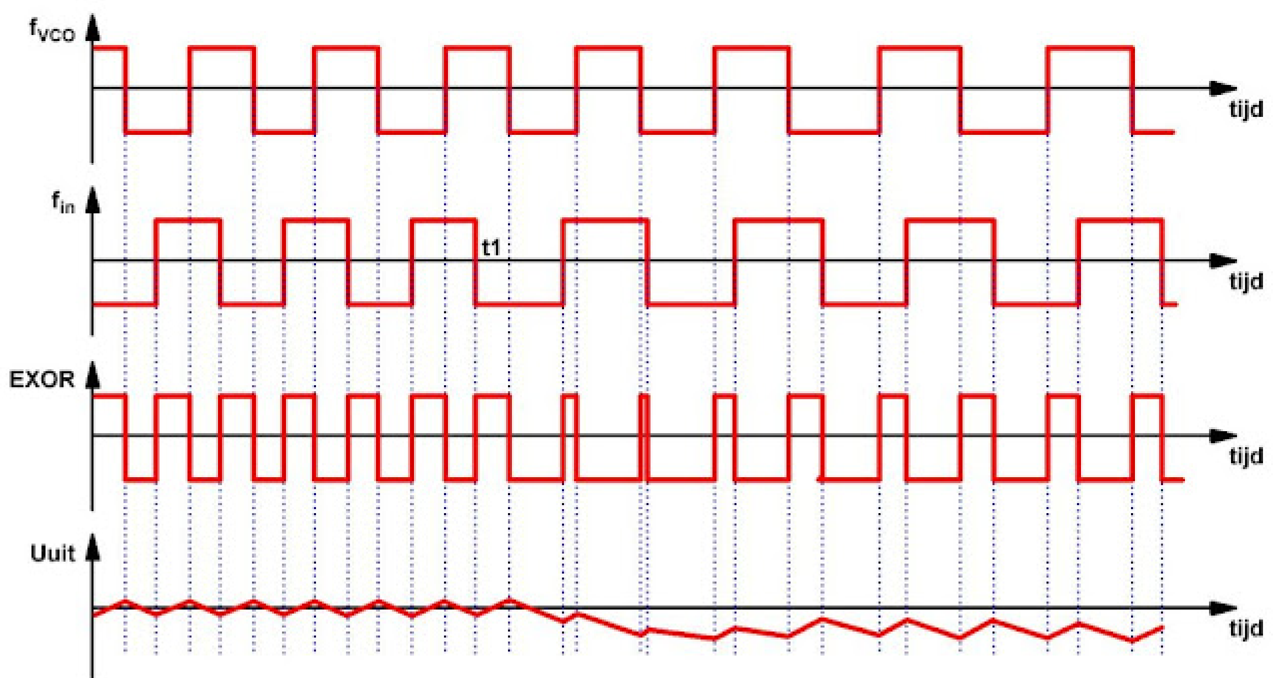
De reactie van een PLL als er opeens een ingangssignaal met frequentie f_o verschijnt.
(© 2021 Jos Verstraten)

De terugkoppeling gaat aan het werk
Het teruggekoppelde systeem zorgt er nu voor dat deze faserelatie zich zo zal instellen dat de regelspanning van de VCO weer nul wordt. Zoals bij de bespreking van de EXOR-vergelijker werd vermeld is dat het geval als er een constante faserelatie van 90° tussen beide signalen ontstaat. De PLL regelt dus de uitgangsfrequentie van de VCO zo dat aan de genoemde faserelatie voldaan wordt.

Samenvatting
Als u aan de ingang van de PLL een signaal aanlegt met een frequentie die gelijk is aan de eigen frequentie van de VCO van de PLL, dan zal de schakeling zichzelf zó regelen dat er een constant faseverschil ontslaat van 90° tussen het ingangssignaal en het uitgangssignaal

van de VCO.

De PLL met ingangssignaal met afwijkende frequentie
Wat er gebeurt als u aan de ingang van een PLL een signaal aanlegt met een frequentie die afwijkt van de eigen frequentie f_o van de VCO is getekend in de onderstaande figuur.
Tot vóór tijdstip t_1 is de frequentie van het ingangssignaal gelijk aan f_o, de eigen frequentie van de VCO. De uitgangsspanning van het filter is nul, het systeem is in evenwicht.
Op tijdstip t_1 wordt de frequentie van het ingangssignaal gevarieerd. Het gevolg is dat er een van 90° afwijkende faserelatie ontstaat tussen beide signalen en dat de fasevergelijker smalle positieve of negatieve pulsen gaat genereren. Deze beïnvloeden de spanning over de condensator op de bekende manier, de gelijkspanning over de condensator neemt een van 0 V afwijkende waarde aan. Het gevolg is dat de VCO wordt gestuurd, zodat deze schakeling zijn frequentie gaat verhogen of verlagen. Uit de grafieken volgt dat de PLL nu een nieuwe evenwichtstoestand opzoekt. De schakeling past zijn eigen frequentie aan deze van het ingangssignaal aan. Het gevolg is dat de VCO blijvend voorzien moet worden van een van nul afwijkend stuursignaal en dat de PLL een gelijkspanning genereert, die een maat is voor het frequentieverschil tussen f_o en f_1, de nieuwe frequentie van het ingangssignaal.



Het gedrag van een PLL als aan de ingang een signaal met van fo afwijkende frequentie wordt gelegd.
(© 2021 Jos Verstraten)

Toepassingen van PLL's

Inleiding
PLL's worden in talrijke analoge technieken gebruikt. In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van een aantal PLL-applicaties.

FM-signalen demoduleren
De VCO wordt afgeregeld op de draaggolf frequentie van het te demoduleren signaal. Iedere afwijking van de frequentie van het ingangssignaal, als gevolg van de FM-modulatie, levert een afwijking op in de stuurspanning van de VCO. Dit signaal is proportioneel aan de frequentie-afwijking en is dus in feite een representatie het modulatiesignaal dat op de draaggolf werd gemoduleerd. Op deze eenvoudige manier kunt u, zonder gebruik te maken van dure en grote spoelen, FM-gemoduleerde signalen terug winnen.

Demodulatie van PSK-signalen
PSK (*Phase Shift Keying*) is een systeem waarbij digitale signalen worden omgezet in wisselspanningen. Een overgang van een 'L' naar een 'H' en vice versa wordt op de wisselspanning gemoduleerd door de fase van dat signaal 180° in fase te draaien. Doordat een PLL in staat is faseverschuivingen te detecteren kan een dergelijke schakeling worden ingezet om de digitale informatie weer uit de in fase gemoduleerde wisselspanning te herwinnen.

Demodulatie van FSK-signalen
Een andere methode die wordt gebruikt om digitale signalen langs bijvoorbeeld een analoge lijn te versturen is het omzetten van de 'L'- en 'H'-niveaus in een signaal met twee verschillende frequenties. Dit noemt men '*Frequency Shift Keying*'. Een PLL is de voor de hand liggende schakeling om deze frequentieverschillen te detecteren en weer om te zetten in een bruikbaar digitaal signaal.

Frequentie vermenigvuldiging
Door het uitbreiden van de basisschakeling met een aantal frequentiedelers tussen de uitgang van de VCO en de ingang van de fasevergelijker ontstaat een systeem waarmee u de frequentie van een ingangssignaal met een bepaalde factor kunt vermenigvuldigen. Zo kunt u bijvoorbeeld uit de nauwkeurige frequentie van een ijkkristal een heleboel frequenties afleiden die allemaal dezelfde nauwkeurigheid hebben als de basisfrequentie.
Een mooi voorbeeld van deze toepassing ziet u in de onderstaande foto: de Marconi TF2015 HF-generator met de TF2171 Digital Synchroniser. De TF2015 levert gemoduleerde en ongemoduleerde sinussen tussen 10 MHz en 520 MHz tot 200 mV. De TF2171 heeft intern een uiterst stabiele frequentie standaard van 5 MHz en een hoop digitale frequentiedelers, waarmee u de frequentie van de TF2015 door middel van zeven draaischakelaars tot op 100 Hz nauwkeurig kunt instellen. Beide apparaten zitten in een teruggekoppeld systeem dat via een PLL de frequentie regelt die de TF2015 genereert. Op deze manier wordt de nauwkeurigheid en stabiliteit van de frequentie gegarandeerd binnen ±1/10.000.000 parts.



De Marconi TF2015/TF2171 combinatie is een mooi voorbeeld van een PLL-toepassing. (© Marconi Instruments)

Afgestemde filters
Met een uitgebreide PLL-schakeling kunt u filters samenstellen met zeer steile doorlaat- of

sperbanden. Als het noodzakelijk is kan men op een dergelijke manier banddoorlaat filters ontwerpen met een bandbreedte van slechts enige tientallen Hz, iets dat met normale analoge filtertechnieken absoluut onmogelijk is.

Signal conditioning
Een zeer belangrijke toepassing van PLL's, waarmee het mogelijk is een signaal terug te winnen uit een ruissignaal dat veel groter is dan het signaal zelf.

Stereodemodulatie
Waarschijnlijk verdwijnt analoge FM in 2023 uit de lucht. Tot die datum kunt u nog steeds met een FM-tuner kwalitatief hoogwaardige analoge radio ontvangen. In moderne FM-tuners worden PLL-technieken toegepast voor het decoderen van de stereo-signalen. Bij het uitzenden van een analoog FM-stereosignaal worden beide kanalen L en R gecodeerd verstuurd onder de vorm van de som- en verschilsignalen L+R en L-R. Het L-R signaal is gemoduleerd op een onderdrukte draaggolf van 38 kHz. Om deze draaggolf in de ontvanger weer te kunnen herstellen wordt een piloottoon met een frequentie van 19 kHz mee verzonden. Door middel van een PLL kan men uit dit signaal de draaggolf van 38 kHz zeer nauwkeurig terug winnen, zonder dat gebruik gemaakt moet worden van afgestemde filters met spoelen en condensatoren.